

METODE KESEIMBANGAN BATAS vs METODE ELEMEN HINGGA UNTUK ANALISIS PONDASI DANGKAL MENERUS PADA TANAH KOHESIF

Yusep Muslih Purwana

Laboratorium Mekanika Tanah FT UNS Jl. Ir. Sutami 36a Solo. Email : ymuslih@yahoo.com

Ahsin Pramugani

Laboratorium Mekanika Tanah FT UNS Jl. Ir. Sutami 36a Solo.

Wahyu Setiawan

Laboratorium Mekanika Tanah FT UNS Jl. Ir. Sutami 36a Solo.

Abstract

The most common analysis methods on shallow foundation are Terzaghi, Meyerhof, and Vesic. All of them are based on limit equilibrium, when the foundation starting to failure by applying maximum load. One of disadvantages of this method is that deformation and displacement of foundation and soil are not being considered. This behavior is very important for determining ultimate bearing capacity. The subject of this research is to compare the bearing capacity of shallow foundation between limit equilibrium method and finite element method (FEM). The foundation is modeled as strip rigid footing, whereas soil media is cohesive material with Mohr-Coulomb material model. The variation of soil consistency are: very soft, soft, medium, stiff and very stiff. The result indicates that bearing capacity by using finite element approach is relatively different from limit equilibrium method. The first methods is larger than the last one. By using FEM, soil deformation around the foundation can also be determined.

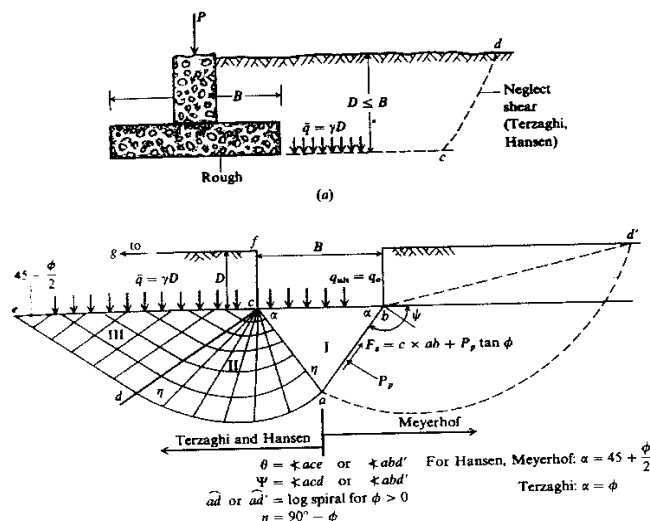
Keywords:

finite element method, limiting equilibrium, Mohr-Coulomb material model, shallow foundation

PENDAHULUAN

Pondasi dangkal adalah pondasi dimana transfer beban dari struktur ke tanah terjadi dekat dengan permukaan, (Coduto, 1994). Menurut Terzaghi (1943), dianggap pondasi dangkal apabila letak dasar pondasi dari muka tanah (D) kurang atau sama dengan lebar dasar pondasi (B), (Das, 1994).

Untuk menentukan kapasitas dukung ultimit pondasi dangkal, Terzaghi mengembangkan suatu teori yang pada awalnya diajukan oleh Prandtl. Mekanisme keruntuhan diasumsi seperti pada Gambar 1. Dengan menggunakan pendekatan keseimbangan batas, kapasitas dukung ultimit pondasi menerus dapat ditentukan menggunakan Persamaan [1].



Gambar 1. Mekanisme keruntuhan pada analisis pondasi dangkal

$$q_u = cN_c s_c + qN_q + 0.5\gamma BN_\gamma s_\gamma \dots\dots\dots [1]$$

dimana c adalah kohesi, γ adalah berat isi tanah, q = $D\gamma$, N_c , N_q , N_γ adalah faktor kapasitas dukung, dan s adalah faktor bentuk seperti disajikan pada Tabel 1.

Meyerhof dan Vesic memasukkan faktor kemiringan dan faktor kedalaman sehingga persamaan umum untuk kapasitas dukung ultimit metode keseimbangan batas adalah Persamaan [2].

$$q_u = cN_c i_c d_c + qN_q i_q d_q + 0.5\gamma BN_\gamma i_\gamma d_\gamma \dots [2]$$

dengan s, i, dan d adalah faktor bentuk, kemiringan dan kedalaman (Bowles, 1997).

Tabel 1. Faktor Kapasitas Dukung

No.	Metode	Faktor kapasitas pendukung
1.	Terzaghi	$N_q = \frac{a^2}{2 \cos^2 (45 + \phi / 2)}$ $a = e^{(0.75\pi - \phi / 2) \tan \phi}$ $N_c = (N_q - 1) \cot \phi$ $N_\gamma = \frac{\tan \phi / 2}{2} \left(\frac{K_{py}}{\cos^2 \phi} - 1 \right)$
2.	Meyerhof	$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 (45 + \phi / 2)$ $N_c = (N_q - 1) \cot \phi$ $N_\gamma = (N_q - 1) \tan (1,4 \phi)$
3.	Vesic	$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 (45 + \phi / 2)$ $N_c = (N_q - 1) \cot \phi$ $N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi$

Mekanisme keruntuhan dibagi menjadi 3 zone: zone I (zone triangular), zone II (geser radial), dan zone III (zone pasif Rankine). Pada metode ini, walaupun pola keruntuhan sudah dapat diprediksi, namun deformasi tanah di sekitar pondasi belum dapat ditentukan.

Kekurangan yang ada pada metode keseimbangan batas dapat diatasi dengan menggunakan metode elemen hingga (MEH). Pada metode ini tanah dianggap sebagai media *contunuum* yang dibagi menjadi elemen-elemen. Perilaku deformasi yang terjadi tergantung dari parameter tanah yang diperoleh dari hasil pengujian dan besar kecilnya beban yang bekerja. Dari perilaku deformasi tersebut dapat ditentukan beban ultimit yang dimiliki oleh pondasi.

Persamaan elemen hingga pada kondisi *plane strain* secara ringkas ditunjukkan oleh Persamaan [3].

$$[K]\{a\} = \{F\} = \{F_b\} + \{F_s\} + \{F_n\} \dots\dots\dots [3]$$

dimana:

$[K]$ = *stiffness matrix*

$$= \int_A ([B]^T [C] [B]) dA$$

$\{a\}$ = nodal displacement

$\{F\}$ = gaya yang diberikan pada node

$\{F_s\}$ = gaya akibat tegangan permukaan

$$= \int_L p t (< N >^T) dL \text{ untuk analisis 2 dimensi}$$

$$= \int_L p (< R < N >^T) dL \text{ untuk } axiymmetric$$

$\{F_n\}$ = gaya terpusat

$\{F_b\}$ = gaya badan

Desai dan Christian (1987) telah melakukan studi dengan membandingkan besarnya tegangan vs. perpindahan model laboratorium (eksperimen) dengan model matematik menggunakan MEH. Hasil studi tersebut menunjukkan bahwa MEH dapat memberikan hasil yang memuaskan untuk prediksi tegangan dan deformasi. Kurva kedua metode tersebut sangat bagus dan berhimpit. Akan tetapi pada penelitian tersebut, Desai dan Christian tidak melakukan analisis besarnya kapasitas dukung dari kedua metode tersebut.

Irawan (2007) melakukan studi MEH untuk membandingkan model eksperimen di laboratorium yang dilakukan oleh Suwanto (2005). Model material yang digunakan adalah elastik linear, *Mohr-Coulomb* dan *Hardening Soil (HS)*, dengan parameter tanah diperoleh melalui korelasi. Hasil studi menunjukkan bahwa model *HS* paling mendekati hasil eksperimen di laboratorium.

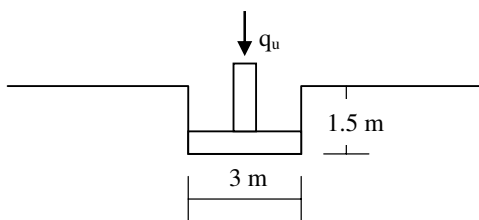
Bujang dan Thamer (2006) melakukan studi elemen hingga pada pondasi dangkal berupa *slab* dan *shell* menggunakan Plaxis. Hasil studi menunjukkan bahwa analisis menggunakan MEH menghasilkan kecocokan eksperimen di laboratorium, dengan tingkat kesalahan antara 11 – 25 %.

Pramugani dan Setiawan (2007) melakukan studi untuk membandingkan kapasitas dukung pondasi dangkal menggunakan metode elemen hingga dan metode keseimbangan batas. Hasil penelitian menunjukkan adanya korelasi antara nilai kohesi dengan kapasitas dukung. Perbedaan yang terjadi pada metode tersebut mungkin akibat adanya parameter E dan μ pada metode MEH, sedangkan pada metode keseimbangan batas parameter ini tidak dikenal.

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan kapasitas dukung ultimit pondasi dangkal menerus pada tanah kohesif. Akan dibandingkan kapasitas dukung ultimit antara metode keseimbangan batas dengan MEH. Tanah dimodelkan sebagai material Mohr-Coulomb dengan konsistensi bervariasi mulai dari sangat lunak sampai dengan sangat kaku, sedangkan pondasi dimodelkan sebagai plat kaku.

METODE

Pada penelitian ini, pondasi dianggap terletak pada tanah dengan kedalaman $D = 1.5$ m dan lebar $B = 3$ m (Gambar 2). Parameter tanah pada berbagai konsistensi berupa berat isi tanah γ_b , kohesi c , modulus elastisitas tanah E_s , dan Poisson's ratio μ disajikan dalam Tabel 2.



Gambar 2. Lebar dan kedalaman pondasi

Tabel 2. Parameter tanah

Konsistensi	γ_b (kN/m^3)	c (kN/m^2)	E_s (kN/m^2)	μ
Sangat Lunak	4.31	10	1750	0.35
Lunak	10.78	35	17500	0.35
Sedang	12.94	65	35000	0.325
Kaku	19.40	90	75000	0.325
Kaku	19.40	90	75000	0.3
Sangat Kaku	23.77	125	150000	0.25

Metode Keseimbangan Batas

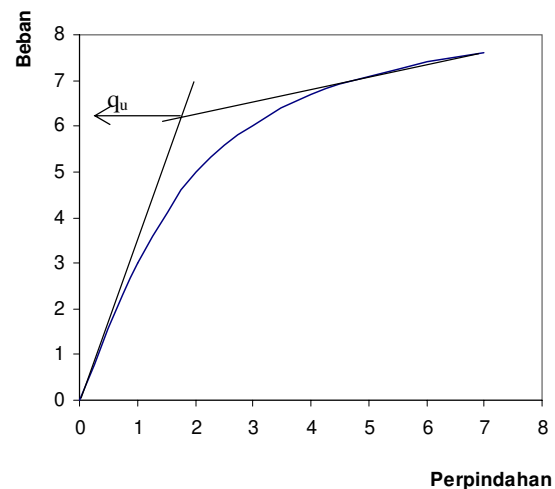
Penentuan kapasitas dukung metode keseimbangan batas dilakukan dengan menggunakan persamaan [1] dan [2]. Hasil hitungan untuk berbagai variasi konsistensi tanah dilakukan menggunakan *spreadsheet* dan disajikan dalam bentuk tabulasi.

MEH

Analisis menggunakan metode elemen hingga dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *Plaxis Ver. 8*. Langkah-langkah yang dilakukan adalah penentuan geometri model, penentuan model material, penentuan parameter model, dan kalkulasi. *Plaxis* secara otomatis akan membagi medium tanah menjadi elemen-elemen segitiga. Keluaran yang dihasilkan diantaranya berupa hubungan beban vs. perpindahan, deformasi, dan kontur tegangan.

Interpretasi Kurva Tegangan vs Perpindahan

Untuk mendapatkan tegangan dan perpindahan di dasar pondasi, ditentukan satu titik tepat di tengah-tengah dasar pondasi. Pondasi diberikan beban *step by step* sampai diperoleh kurva, dimana dapat diperkirakan mendekati keruntuhan. Selanjutnya dari kurva tersebut dilakukan interpretasi untuk mendapatkan kapasitas dukung ultimit q_u . Salah satu cara penentuan q_u adalah dengan menarik dua garis lurus pada awal kurva dan akhir kurva. Garis pertama adalah sejajar dengan kemiringan awal kurva, sedangkan garis kedua adalah sejajar dengan kemiringan akhir kurva. Kedua garis tersebut bertemu pada suatu titik, yang selanjutnya dari titik tersebut ditarik garis horisontal sehingga diperoleh nilai q_u (Gambar 3).



Gambar 3. Interpretasi menentukan q_u

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kapasitas Dukung Terzaghi, Meyerhof dan Vesic

Tabel 3 menunjukkan perhitungan kapasitas dukung menggunakan metode Terzaghi, Meyerhof, dan Vesic. Ketiga metode tersebut menghasilkan nilai q_u yang relatif sama. Perbedaan dari ketiga metode tersebut adalah pada pengambilan nilai N_c dan d_c . Pada metode Terzaghi, untuk tanah lempung murni ($\phi = 0$), nilai $N_c = 5.7$, sedangkan menurut Meyerhof dan Vesic $N_c = 5.14$.

Tabel 3. Kapasitas dukung ultimit metode keseimbangan batas

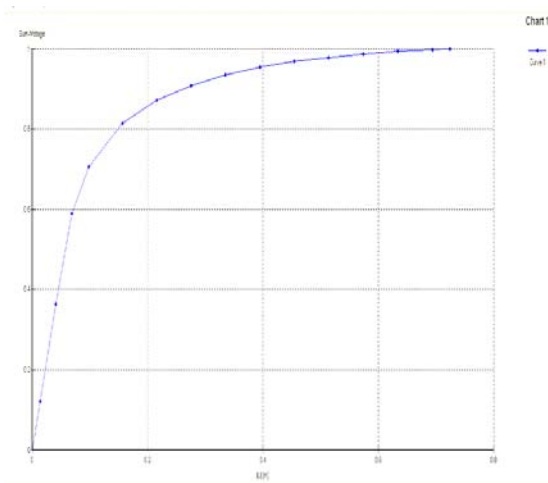
Analisis	Kapasitas Dukung Ultimit q_u (kN/m^2)				
	Sangat Lunak	Lunak	Sedang	Kaku	Sangat Kaku
Terzaghi	63.47	215.67	389.91	542.10	748.16
Meyerhof	63.00	214.06	386.92	537.96	742.41
Vesic	68.155	232.05	420.33	584.22	806.66

Selanjutnya terdapat perbedaan nilai d_c untuk semua metode. Terzaghi tidak memasukkan faktor d_c ,

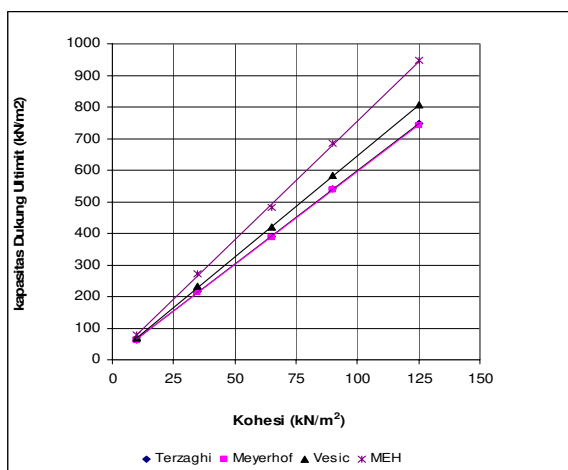
sementara nilai d_c untuk Meyerhof dan Vesic masing-masing 1.1 dan 1.2. Perbedaan pada faktor kapasitas dukung ini menyebabkan nilai q_u untuk ketiganya berbeda, dimana metode Meyerhof paling konservatif.

Kapasitas Dukung MEH

Parameter *input* untuk MEH dapat dilihat dari Tabel 2. Untuk memodelkan pondasi plat kaku, digunakan nilai $EI = 1 \times 10^8 \text{ kNm}^2/\text{m}$, $EA = 1 \times 10^9 \text{ kN/m}$. (Brinkgrive dan Waterman, 2006). Gambar 4 menunjukkan salah satu contoh keluaran berupa grafik perpindahan vs. beban. Sumbu x adalah perpindahan, sedangkan sumbu y adalah sumstage. Beban yang terjadi diperoleh dengan mengalikan nilai ultimit pada gambar tersebut dengan besarnya beban input.



Gambar 4. Tipikal grafik beban perpindahan

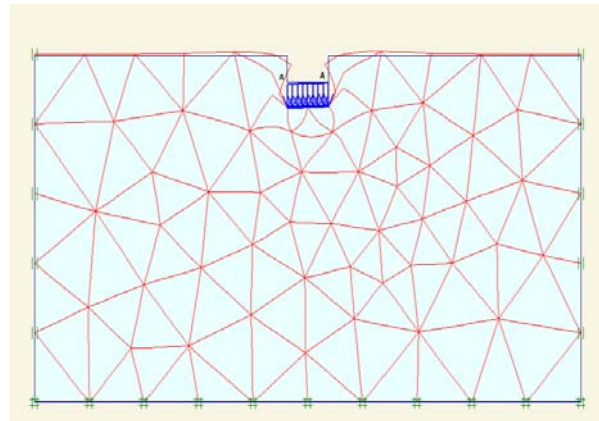


Gambar 5. Kapasitas dukung ultimit pada berbagai nilai kohesi tanah

Hasil interpretasi dari grafik beban dan perpindahan menghasilkan kapasitas dukung ultimit q_u . Pada beberapa konsistensi tanah (diwakili oleh kohesi), nilai q_u dapat dilihat pada Gambar 5. Nilai q_u metode elemen hingga relatif berbeda dan selalu lebih tinggi dibanding metode keseimbangan batas. Perbedaan ini akibat dimasukkannya properti tanah berupa E dan μ pada MEH yang berakibat pada perilaku regangan dan deformasi pada tanah, sementara pada metode keseimbangan batas, perilaku regangan dan deformasi ini tidak dianalisis.

Deformasi Tanah

Dengan menggunakan MEH, deformasi yang terjadi pada tanah dapat ditentukan. Gambar 6 menunjukkan tipikal deformasi yang terjadi pada tanah akibat pembebanan pada pondasi menerus. Pada bagian kiri dan kanan terjadi *heaving*, yaitu penggelembungan. Hal ini terjadi akibat tanah di bawah pondasi terdesak ke segala arah, yang pada akhirnya juga akan mendesak tanah di atasnya. Pada metode keseimbangan batas, *heaving* ini tidak dapat dianalisis.



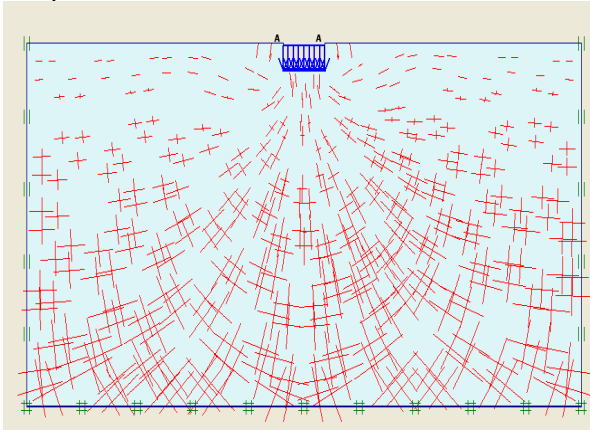
Gambar 6. Tipikal deformasi tanah akibat beban pondasi dangkal

Deformasi yang relatif paling besar terjadi pada daerah yang dekat dengan pusat beban, dan semakin jauh dari pusat beban, deformasi ini semakin kecil.

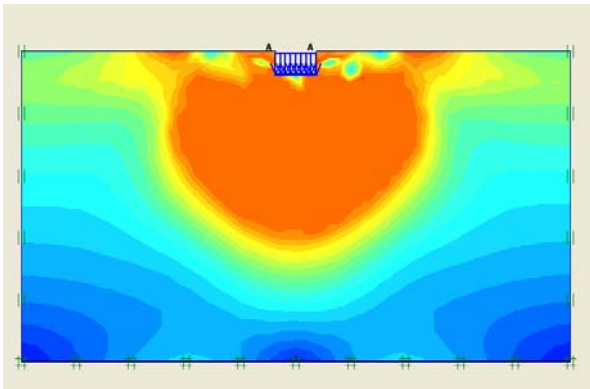
Principle Stress dan Stress Contour

Gambar 7 menunjukkan *principle stress* yang terjadi pada tanah, yang membentuk pola spiral. Principle stress adalah tegangan yang terjadi pada bidang dimana tegangan gesernya nol. Sedangkan Gambar 8 menunjukkan kontur tegangan di bawah pondasi yang membentuk seperti bola. Bentuk ini mirip dengan *bulb pressure* yang biasa ditemukan pada analisis penyebaran tegangan metode Boussinesq yang menggunakan teori elastisitas. Menurut teori Boussinesq, semakin jauh suatu titik

dari pusat tegangan, semakin kecil pengaruh yang didapatkan.



Gambar 7. *Principal stress* pada tanah di bawah pondasi



Gambar 8. Kontur tegangan di bawah pondasi dangkal

SIMPULAN

Kapasitas dukung pondasi dangkal metode keseimbangan batas (Terzaghi, Meyerhof dan Vesic) hampir identik, dimana metode Meyerhof paling konservatif.

Perbedaan penentuan faktor kapasitas dukung menyebabkan perbedaan kapasitas dukung antara metode Terzaghi, Meyerhof dan Vesic.

Parameter E dan μ model *Mohr-Coulomb* pada metode elemen hingga menyebabkan perilaku regangan dan deformasi pada tanah, yang mana pada metode keseimbangan batas perilaku ini tidak terjadi.

Kapasitas dukung metode elemen hingga relatif lebih tinggi dibandingkan metode keseimbangan batas.

Tegangan dan deformasi pada seluruh elemen tanah dapat ditentukan dengan menggunakan MEH, sedangkan pada metode keseimbangan batas, analisis keseimbangan hanya dilakukan di sekitar pondasi saja.

REKOMENDASI

Perlu dilakukan *back analysis* untuk mendapatkan sejauh mana pengaruh parameter E dan μ terhadap perilaku deformasi tanah.

Perlu dilakukan analisis kapasitas dukung pada tanah tidak kohesif.

Perlu dilakukan analisis kapasitas dukung dengan variasi kedalaman pondasi, lebar pondasi, kekakuan pondasi, muka air tanah.

REFERENSI

- Bowles, J. E., 1997, "Foundation Analysis and Design", McGraw-Hill, New York.
- Brinkgrive R.B.J., dan Waterman D., 2006, "Plaxis", Netherlands.
- Bujang B.K., dan Thamer A Mohammed, 2006, "FE Study using FE Code (Plaxis) on the Geotechnical Behavior of Shell Footing", *Journal of Computer Science 2 (1)*, University of Malaya.
- Coduto, D.P., 1994, "Foundation Design, Principle and Practices", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Das, B.M., 1994, "Principle of Geotechnical Engineering", PWS Publishing Company, Boston.
- Desai C.S., Christian J.T., 1987, "Numerical Methods in Geotechnical Engineering", McGraw Hill, New York.
- Irawan R., 2007, "Analisis Tegangan-Deformasi Tanah Pasir Tanpa Perkuatan di Bawah Pondasi Dangkal Menggunakan Metode Elemen Hingga", Skripsi Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, UNS.
- Pramugani A., Setiawan W., 2007, "Perbandingan Metode Keseimbangan Batas dengan Metode Elemen Hingga pada Analisis Pondasi Dangkal", Skripsi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UNS.
- Suwarto, 2005, "Studi Perkuatan Anyaman Serat Nilon di Bawah Pondasi Dangkal pada Tanah Pasir dengan Kondisi Terjepit", Skripsi Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, UNS.
- Terzaghi K., 1943, "Theorethical Soil Mechanics", Wiley, New York.

